

Electromagnetic-Acoustic Transducer를 이용한 비파괴평가

안봉영, 이승석
한국표준과학연구원 방재기술연구센터 비파괴그룹

Nondestructive Evaluation Using Electromagnetic-Acoustic Transducer

Bong Young Ahn and Seung Seok Lee
NDE Group, Failure Prevention Center
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-340

요 약 EMAT는 비접촉으로 초음파를 송수신 할 수 있는 탐촉자로서 시험체와 탐촉자간의 접촉을 위한 매개 물질이 필요치 않으므로, 움직이고 있는 물체에 초음파탐상법을 적용하고자 하는 분야와 초음파의 속도를 정밀하게 측정하고자 하는 분야에 주로 응용된다. 구체적으로는 길이가 긴 튜브류의 결함 탐상, 용접중인 재료의 용접 상태 감시, 기차바퀴 및 레일의 결함 탐상, 고온상태인 재료의 결함 탐상 등이 비접촉 특성을 이용하여 적용될 수 있는 분야이며, 재료의 집합조직 및 소성이방성의 측정, 재료의 미세조직 및 기계적 강도의 예측, 그리고 잔류응력의 측정 등이 정밀한 초음파속도 및 감쇠의 측정으로부터 적용될 수 있는 분야이다. EMAT가 일반적인 접촉식 초음파탐상법에 비하여 특별한 분야에의 응용에 큰 장점을 가지고 있지만, 낮은 에너지 전환효율, 넓은 불감영역, 그리고 사용주파수의 한계 등의 문제를 가지고 있기 때문에 기존의 접촉식 방법의 적용이 용이한 분야에의 적용은 필요하지 않다. 그러나 특별한 목적과 용도에의 적용 필요성이 생길 경우에는 적절한 연구를 통하여 알맞은 탐촉자를 제작하고 탐상 방법을 개발함으로써 본래의 목적에 알맞은 탐상이 수행될 수 있다.

1. 서론

EMAT (electromagnetic-acoustic transducer)는 탐촉자와 시험체 사이에 물리적인 접촉 없이 전자기적인 힘을 이용하여 초음파를 송수신 할 수 있는 새로운 형태의 탐촉자를 말한다. 비접촉으로 초음파를 송수신하면 움직이고 있는 시험체에 대한 탐상이 용이하므로 제품의 제조공정상에서의 연속적인 품질관리가 가능해진다. 또한 철강생산 라인의 경우처럼 시험체의 온

도가 매우 높아서 접촉을 위한 마땅한 수단이 없거나, 시험체의 특성상 접촉매질에 의한 시험체의 표면 손상이 중요한 문제를 야기할 수 있는 경우 등에는 비접촉 초음파 탐상법이 필수적으로 요구된다. 비접촉으로 초음파를 송수신하는 수단으로는 레이저를 이용하는 방법¹⁾과 capacitive probe²⁾를 이용하는 방법, 그리고 EMAT를 이용하는 방법 등이 이용되고 있다. 이 중에서 EMAT를 이용하는 방법은 초음파 송수신을 위한 탐촉자를 제외하고는 기존의 접촉식 탐상법과 완전

히 동일하므로 실제 환경에의 적용을 위해서 가장 많이 응용되고 있다. EMAT의 또다른 장점은 송수신되는 초음파의 모우드를 쉽게 결정할 수 있다는 것이다. 즉, EMAT로 부터 형성되는 정자기장과 동자기장의 상대적인 방향을 조절하므로써 종파, 횡파 뿐 아니라 표면파와 판파를 별도의 매개체 없이 선택적으로 송수신할 수 있다. 이와 같은 모우드의 선택성은 다른 비접촉 방법으로는 실현할 수 없으며, 접촉식 초음파탐촉자에 비하여도 탁월한 특성이다.

1960년대 후반, 비접촉 음향공진현상이 발견된 후 Betjeman³⁾, Gaertner⁴⁾, Grubin⁵⁾ 등에 의해서 비접촉으로 초음파를 송수신하는 연구가 진행되면서 1970년 Dobbs⁶⁾에 의해 기본 이론이 확립되었다. EMAT를 이용하는 초기의 연구는 각 모우드의 초음파의 송수신에 대한 기본 연구를 비롯하여 주로 결함을 검출하는 방향으로 진행되었다. 용접부 내에서의 결함검출에 대한 연구가 미국의 NIST⁷⁾ 등을 중심으로 수행되었고, 독일의 IzfP⁸⁾와 미국의 Rockwell International Science Center⁹⁾에서는 길이가 긴 튜브에서의 초음파 송수신 및 결함검출에 대한 많은 연구결과를 발표하였다. 또한 고온상태에 있는 시험체의 탐상을 위하여 고온용 EMAT의 개발에 대한 연구도 일본, 미국, 영국을 중심으로 활발히 연구되어 왔다^{10~12)}. 근래의 EMAT를 이용한 연구는 결함의 평가보다는 시험체의 재질평가를 위한 방향으로 진행되고 있다. 미국의 Iowa 주립 대학 및 일본의 오사카 대학을 중심으로 압연판재의 집합조직 및 소성이방성의 측정에 대한 연구를 비롯하여 잔류응력의 측정에도 EMAT가 이용되고 있다^{13~15)} EMAT는 압전형 탐촉자에 비하여 전자기적 에너지를 역학적 진동에너지로 바꾸어 주는 전환효율이 크게 낮기 때문에 압전형 탐촉자와 비슷한 수준의 s/n를 얻기는 매우 어렵다. 최근 들어 시험체내를 진행하는 초음파의 파장과 시험체의 두께와의 관계로부터 정의되는 음향공진현상을 이용하여 시험체 내에서의 초음파의 진행속도와 감쇠를 측정할 수 있는 장비와 기술이 개발되어 EMAT의 최대 약점인 낮은 전환효율에 의한 낮은 s/n의 문제가 상당히 극복되었다. 그러므로 최근 들어 미국의 NIST와 일본의 오사카대학¹⁶⁾, 동경공대¹⁷⁾ 등을 중심으로 이 기술을 이용하여 시험체의 물성을 평가하는 연구결과가 꾸준히 발표되고 있다.

본 논문에서는 그 동안 한국표준과학연구원 비파괴평가그룹에서 수행하였던 EMAT에 관련된 연구를 중심으로 EMAT의 구조와 초음파송수신 원리를 설명하

며, EMAT의 응용분야로 튜브와 용접부의 결합 탐상, 냉연강판의 소성이방성 측정, 압연강판의 미세구조 및 강도 예측을 위한 EMAT 응용 기술에 대한 내용을 기술하였다.

2. EMAT의 구조와 초음파 송수신 원리

EMAT는 시험체의 표면부근에 와전류를 발생시키기 위한 코일과 정자기장을 가하기 위한 자석으로 구성된다. Fig. 1과 같이 시험체의 표면근처에 놓인 코일

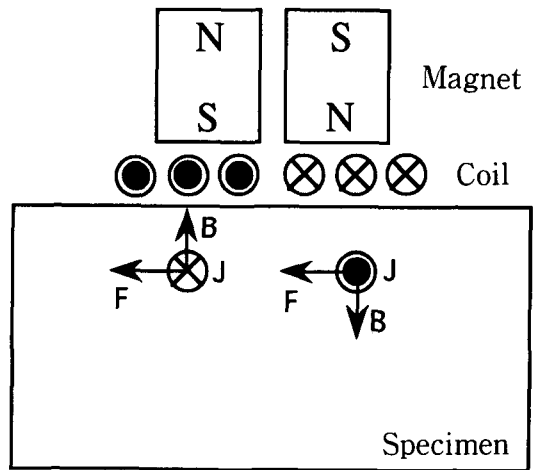


Fig. 1. EMAT의 초음파 송수신 원리

에 교류전류를 가하면 동자기장이 형성되며, 이 동자기장내에 놓이는 전기전도체의 시험체내에는 전자기유도에 의하여 와전류(eddy current)가 형성된다. 이 상태에서 정자기장을 동시에 가하면 시험체 표면에 있는 입자들은 식(1)의 Lorentz 힘을 받게 된다.

$$F = J \times B \dots\dots\dots(1)$$

식에서 J는 와전류 밀도이고, B는 정자기장의 자속 밀도이며, F는 Lorentz 힘이다.

위의 식에서 힘의 방향 F는 와전류밀도 J와 자속밀도 B의 상대적인 방향에 의해서 결정된다는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 즉, 종파의 발생을 위해서는 J와 B의 방향이 모두 시험체의 표면에 평행하도록 코일과 자석을 배열하고, 횡파의 발생을 위해서는 J는 시험체의 표면에 평행한 반면 정자기장 B는 시험체의 표면에 수직하도록

배열하면 된다. Fig. 2에서는 각종 모우드의 초음파 발생을 위한 여러 EMAT의 구조를 보여주고 있다.

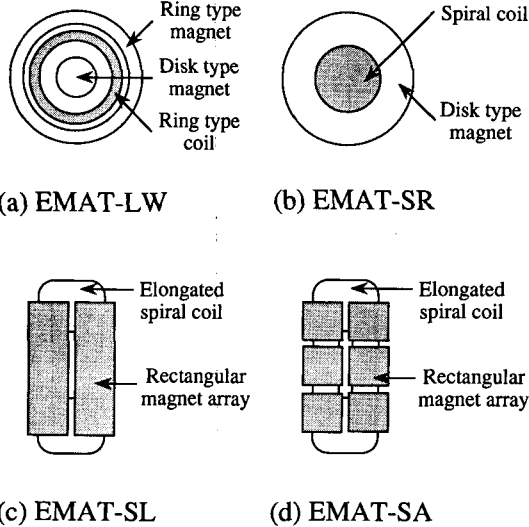


Fig. 2. 여러 종류의 EMAT 구조

그림에서 EMAT-LW(longitudinal wave)는 종파용 탐촉자, EMAT-SR(radially polarized shear wave)은 방사형의 진동 모우드를 갖는 횡파용 탐촉자, EMAT-SL(linearly polarized shear wave)은 한 방향으로 진동하는 횡파용 탐촉자, EMAT-SA는 역시 한 방향의 진동모우드를 갖는 횡파용 탐촉자로 PPM EMAT(periodically arrayed permanent magnets EMAT)라 불리는 탐촉자의 구조를 각각 나타낸다. 응용분야에 따라서 위의 구조중 알맞은 탐촉자를 제작하여 사용할 수 있다. 즉, 두께가 비교적 두꺼운 시험편에서 순수한 종파 또는 횡파를 발생시키기 위해서는 Fig. 2의 EMAT-LW와 EMAT-SR 그리고 EMAT-SL이 적당하다. EMAT-SR은 경우에 따라서는 종파와 횡파를 한꺼번에 발생시키기 위해서 사용되기도 한다. 반면에 두께가 얇은 시험편과 튜브류의 시험편에 표면파 또는 판파를 발생시키기 위해서는 EMAT-SA가 적당하며, 초음파의 진행방향을 적당히 선택할 수 있으므로 용접부 등의 탐상에도 많이 이용되는 구조이다.

3. EMAT의 방향 특성 측정^{18,19)}

제작된 EMAT는 코일과 자석의 형상과 사용 주파수에 따라 발생하는 초음파의 방향 특성이 달라진다. 각 EMAT의 구조에 따라 방향 특성이 달라지지만 대체적으로 piston형, line-array형, ring형등 3종류의 초음파

발생원으로 가정하여 방향 특성을 해석할 수 있으며, 각 발생원에 의한 초음파의 방향 특성은 식(2)~식(4)와 같이 계산된다.

a. Directional factor of a piston source

$$H(\theta) = \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \dots \dots \dots (2)$$

b. Directional factor of a line array source

$$H(\theta) = H_1(\theta)H_2(\theta) = \left| \frac{\sin(\frac{1}{2}kL \sin \theta)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right| \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \frac{N}{2}kd \sin \theta}{\sin \frac{1}{2}kd \sin \theta} \right| \dots \dots \dots (3)$$

c. Directional factor of a ring source

$$H(\theta) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_a^b \frac{e^{-jk(r^2 + \sigma^2 - 2r\sigma \sin \theta \cos \phi)}}{\sqrt{r^2 + \sigma^2 - 2r\sigma \sin \theta \cos \phi}} \sigma d\sigma d\phi \dots \dots \dots (4)$$

식(2)에서 a는 피스톤의 반경이며, k는 파수이고, J₁는 1차 Bessel 함수이다. 식(3)에서 d, L, N은 각각 라인의 반경, 길이, 그리고 라인의 갯수이다. 한편 식(4)에서 a와 b는 각각 링의 내경과 외경이다. 앞의 Fig. 2의 EMAT의 경우, (a)는 ring형, (b)와 (c)는 piston형, (d)는 line-array형으로 생각할 수 있으며, 각 경우에 대하여 1 MHz의 사용주파수를 고려하여 계산한 결과와 실제 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 실선은 계산 결과이고 점선은 측정 결과이다. 그림에서 (a), (b), (c)의 구조를 갖는 EMAT로 부터는 시험체의 표면에 대하여 수직인 방향으로 진행하는 초음파를 발생시킬 수 있는데, 진행하는 초음파 빔의 폭은 piston형 발생원의

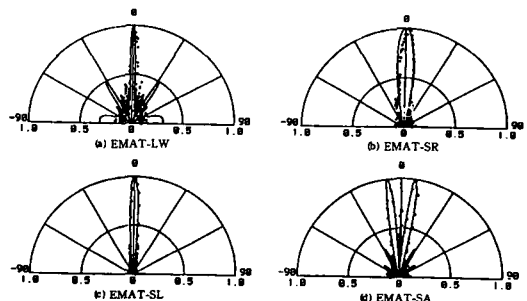


Fig. 3. 각 EMAT에 의해 발생된 초음파 빔의 방향 특성

반경 또는 ring형 발생원의 내경 및 외경, 그리고 사용 주파수에 따라 결정된다. 반면, (d)의 구조를 갖는 EMAT는 사용주파수와 사용된 자석의 두께와 갯수 (number of magnets)에 따라 발생하는 초음파의 진행 방향 및 주빔의 폭이 달라진다. 즉, (d)의 구조를 갖는 EMAT는 주빔의 방향을 원하는 대로 조절할 수 있기 때문에 판재나 튜브의 탐상 등과 같이 특정한 방향으로 입사하는 초음파를 발생시키고자 할 경우 매우 적절히 이용될 수 있는 구조이다.

4. 튜브의 결함 탐상²⁰⁾

발전설비의 많은 부분은 튜브로 이루어져 있으며 현재 대부분의 튜브류의 탐상에는 와전류탐상법이 주로 이용되고 있다. 튜브탐상용 와전류탐촉자는 대부분 원주방향으로 흐르는 와전류를 발생시키기 때문에 튜브의 축방향으로 놓여진 결함에는 매우 민감하게 반응하지만 와전류 흐름의 방향과 동일한 원주방향의 결함에 대해서는 상대적으로 덜 민감하다. 또한 와전류탐상의 경우는 튜브의 탐상을 위해서 탐촉자가 전 튜브를 따라 이동하여야 하므로 탐상에 소요되는 시간이 길 뿐만 아니라, 열교환기 튜브와 같은 U자형의 튜브의 탐상에는 탐촉자의 손상등 어려움이 있다. 튜브의 탐상에 EMAT를 적용하기 위해서는 Fig. 4의 구조를 갖는 EMAT가 이용된다. 이 구조는 원리적으로 Fig. 2(d)의 구조와 유사한 것으로 튜브 내에 발생하는 초음파의 진행방향을 조절할 수 있으므로 원하는 진동모우드의 판파를 선택적으로 발생시킬 수 있다.

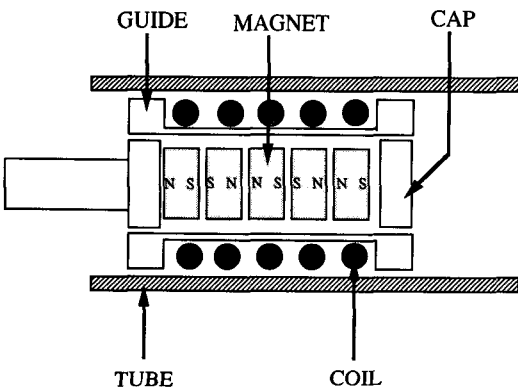


Fig. 4. 튜브탐상용 EMAT의 구조

튜브의 탐상에 EMAT를 이용할 경우, 초음파의 진행 방향이 튜브의 축방향이므로 와전류탐상법과 비교하여

원주방향의 결함에 대하여 상대적으로 민감하며, 탐촉자가 긴 튜브의 전 부분을 움직이지 않고 초음파가 튜브를 진행하므로 탐상에 소요되는 시간이 줄어들고 함께 U자관 등의 탐상시 탐촉자의 파손등과 같은 어려움이 없다. Fig. 5는 길이가 0.5m인 Al-brass 튜브를 여러 번 왕복하는 초음파 신호를 보여주고 있다. 그림에서는 튜브를 7번 왕복한 신호도 큰 감쇠 없이 진행하고 있음을 볼 수 있으므로 길이가 긴 튜브류 탐상에 EMAT 적용 가능성을 확인 할 수 있다. Fig. 6은 두께 1mm, 길이 600mm인 알루미늄 튜브에 가공한 원주방향 결함과 drill hole에 대한 시험 결과이다. 길이 10mm, 깊이 0.2mm의 원주방향의 결함과 직경 1mm의 drill hole로부터의 신호를 뚜렷이 구별할 수 있다. 즉, EMAT를 이용한 튜브의 결함탐상은 탐촉자가 튜브의 끝 부근에 고정된 상태에서 전 튜브를 단시간내에 탐상할 수 있으며, 비교적 작은 결함의 검출능도 우수하므로 신속한 튜브의 탐상에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

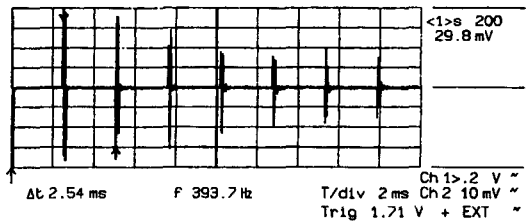
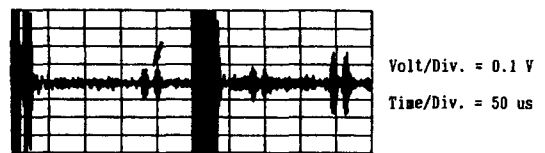
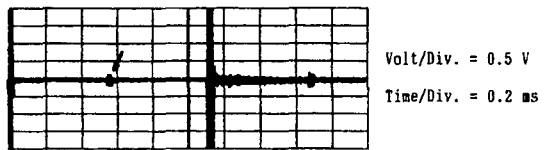


Fig. 5. Al-brass 튜브를 여러번 왕복한 초음파 신호



(a) 원주방향의 결함 (길이 10 mm, 두께 0.2 mm)



(b) drill-hole (직경 1 mm)

Fig. 6. EMAT의 튜브결함 검출 시험 결과

5. 용접부의 결함 탐상²¹⁾

EMAT를 용접부의 탐상에 적용하고자 하는 시도는 고온용 EMAT의 제작이 가능하여 용접 중에 용접 상태를 on-line monitoring 할 수 있다는 점과 용접부

내에서 초음파의 경로가 변하는 소위 beam skewing이 적은 SH wave (horizontally polarized shear wave)를 쉽게 발생시킬 수 있기 때문에 시작되었다. 또한 EMAT는 시험체와 탐촉자 사이의 접촉을 위한 매질이 필요치 않으므로 용접상태의 on-line monitoring을 위한 탐상의 자동화가 매우 용이하다. Fig. 7은 EMAT의 자동화를 위하여 개발된 3축 구동장치이며, Fig. 8은 개발된 탐상장치를 이용하여 용접부위에서 결합 탐상을 수행한 결과이다. 제작된 EMAT는 Fig. 2(d)의 구조를 가지므로, 경사각으로 진행하는 SH파를 송수신할 수 있으며, 자석의 두께와 사용주파수는 각각 3mm와 550 kHz였다. 그리고 결합검출시 lift-off, 즉 탐촉자와 시험편 사이의 간격은 약 1mm이었다. 검출된 결합은 실제 용접시에 생긴 결함이며 결함의 크기 및 위치에 대한 정보는 별도로 수행한 대비시험편을 이용한 측정결과와 비교하여 얻을 수 있다. 본 실험에서의 결과는 이미 용접된 시험편에 대하여 상온에서 측정된 결과이므로 용접중의 on-line monitoring을 위해서는 고온용 탐촉자 제작 등의 연구가 필요하다.

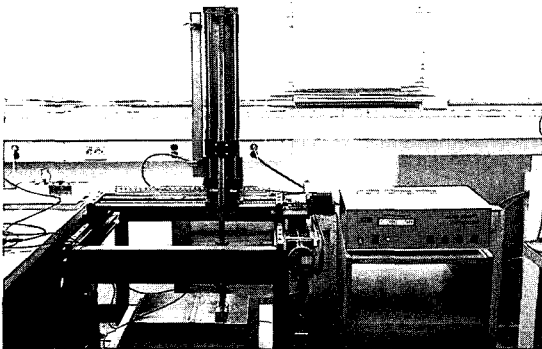


Fig. 7. 용접부 자동초음파탐상장치

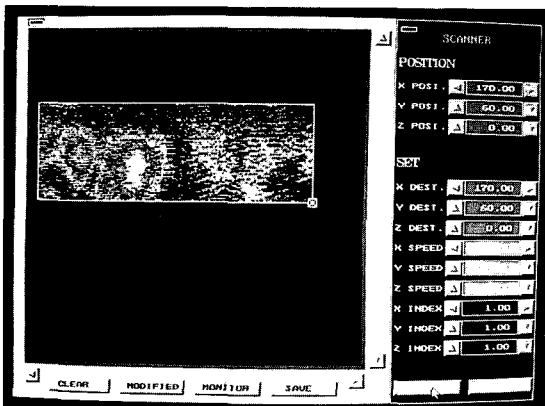


Fig. 8. 용접부 결합의 검출 및 영상화

6. 냉연강판의 소성이방성 측정²²⁾

냉연강판의 제조공정에서 소성이방성은 강판의 성형성을 결정하는 중요한 인자로 시험편을 길이 방향으로 잡아 당겼을 때 두께 방향으로의 변형에 대한 폭 방향의 변형으로 정의된다. 소성이방성의 평가법으로는 기계적 인장시험이나 x-ray법에 의한 평가 방법이 있으나, 두 방법 모두 측정을 위한 별도의 시험편이 필요하고 측정 시간 또한 오래 걸린다. 최근에 압연방향에 대한 초음파 속도의 변화를 측정하면 소성이방성을 평가할 수 있는 비파괴적 방법이 개발되어 이의 평가에 많이 이용되고 있다. EMAT를 이용하여 초음파를 발생시키고자 할 때, 대상재료가 상자성체이면 앞의 식(1)의 Lorentz 힘에 의해서 초음파가 발생된다. 반면에 대상재료가 강자성체이면 Lorentz 힘과 magnetostrictive force의 복합적인 영향에 의해서 초음파가 발생된다. 즉, 강자성체는 자장내에 놓이면 길이 및 부피가 변하는 자왜특성을 나타내므로, 의도적으로 외부의 자장을 주기적으로 변화시키면 강자성체의 국부적인 부위에서는 팽창과 수축을 반복하게 되고 이로부터 초음파가 발생된다. Fig. 9는 자왜현상을 이용하여 초음파를 송수신하기 위한 EMAT의 구조이다.

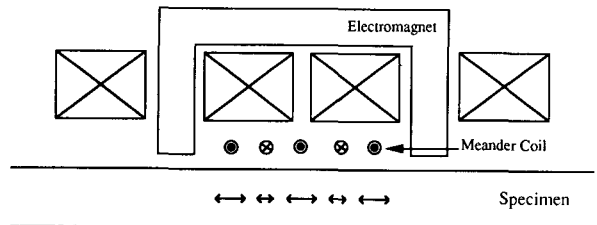


Fig. 9. 자왜형 EMAT의 구조

강자성재료의 자왜계수는 자기장의 세기에 따라 달라지므로 Fig. 9의 전자석에 직류전류를 흘려서 재료를 자왜계수의 변화가 가장 큰 자장영역에 놓이도록 한 후, 전자석 사이에 있는 작은 코일에 교류전류를 흘림으로서 자장의 변화를 주며, 이로부터 코일 바로 아래의 재료표면에는 국부적인 팽창 및 압축이 반복적으로 일어나게 된다. 이렇게 발생하는 초음파는 코일의 주기와 교류전류의 주파수, 그리고 재료의 두께에 따라 다른 모우드의 판파를 형성한다. 압연방향으로 진행하는 S_0 모우드의 초음파 속도와 압연방향에 수직한 방향으로 진행하는 초음파의 속도, 그리고 압연방향에 대하여 45° 방향으로 진행하는 초음파의 속도를 측정하면 이로부터 ODC(orientation distribution coefficients)를 계산 할 수 있으며 이 ODC로부터 압연강판의 소성이방성을 평가

할 수 있다¹³⁾. Fig. 10은 측정된 초음파의 속도로부터 계산한 4차 결정방위계수 W_{400} 와 다결정체의 평균정규 이방성(average normal anisotropy) $\bar{\gamma}$ 를 비교한 결과이다. W_{400} 와 소성이방성 $\bar{\gamma}$ 사이에 1차적인 관계가 있으므로, 초음파 속도 측정이 생산공정중에 이루어지면 이로부터 소성이방성을 비파괴적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다. EMAT를 이용한 소성이방성의 평가 기술은 외국의 생산라인에서는 이미 실용화되어 있다.

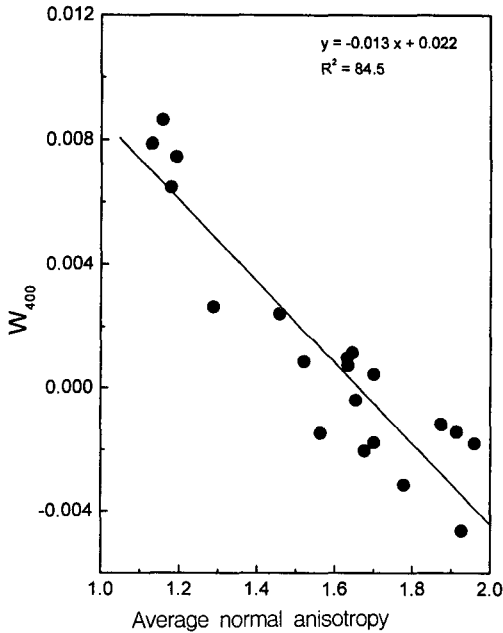


Fig. 10. 기계적 시험에 의한 소성이방성과 초음파로부터 구한 결정방위계수의 비교

7. 강판의 미세구조 및 강도 평가

압연강판의 생산공정에서 제품의 각 부위의 미세구조, 특히 grain size는 제품의 질과 기계적 강도를 결정하는 중요한 인자이다. 생산되는 강판의 grain size와 기계적 강도는 강판의 모든 부위에서 일정하지 않고 부위에 따라 편차를 보인다. 기계적 시험으로 평가되는 강도 값이나 현미경 조직사진의 판독으로 평가되는 grain size는 각 강판의 일부 부위에 대한 측정값이 생산되는 강판의 대표 값이 될 수는 있어도 전 부위의 분포에 대한 정보를 줄 수는 없다. 그러므로 비파괴적으로 이들 측정인자들을 평가하는 기술이 필요하고 이를 위하여 초음파의 속도 및 감쇠를 측정하는 방법이 연구되어 오고 있다. 여기서는 초음파법 중에서 비접촉 방법인 EMAT를 이용하여 초음파의 감쇠를 측정하고 감쇠측

정의 결과와 강판의 grain size 및 기계적 강도를 비교하였다. 측정에 사용된 시험편으로는 조직적으로 ferrite상과 pearlite상으로 구성되어 있는 강판을 이용하였다. 탐촉자로는 Fig. 2의 (b) 또는 (c)의 구조를 갖는 EMAT를 이용할 수 있으며, 감쇠상수는 공진법으로 측정된 공진 주파수로 탐촉자를 여기 시킨 상태에서 신호의 시간에 따른 감소로부터 측정하였다. 그리고 시험편에 따라 공진주파수가 달라지므로 5 MHz에 가장 가까운 공진주파수를 기준으로 측정된 결과를 이용하였다. Fig. 11은 공진주파수 및 감쇠측정의 한 예이며, Fig. 12은 현미경 사진으로부터 평가된 grain size와 기계적 시험으로 얻어진 항복강도를 초음파로 측정된 감쇠상수와 비교한 결과이다. 초음파감쇠는 사용된 초음파의 파장이 입자의 크기 보다 훨씬 큰 rayleigh scattering 영역에서는 입자크기의 3제곱에 비례하여 커진다고 알려져 있으며, 기계적 강도는 입자크기의 1/2승에 반비례한다는 half-etch relation이 널리 이용되고 있다. Fig. 11의

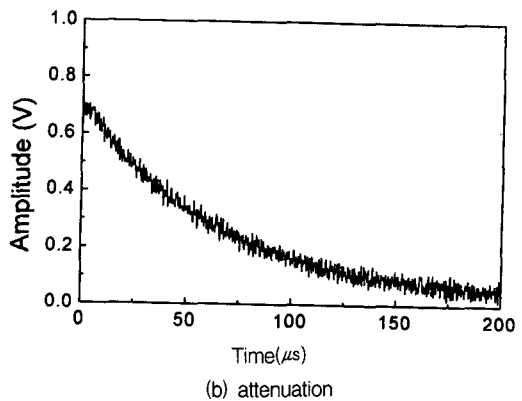
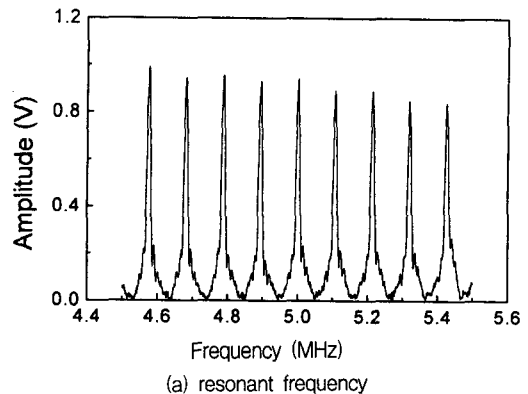
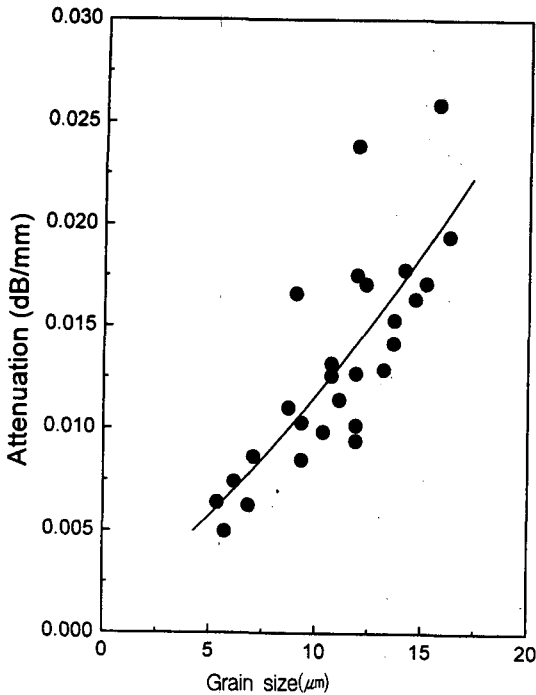


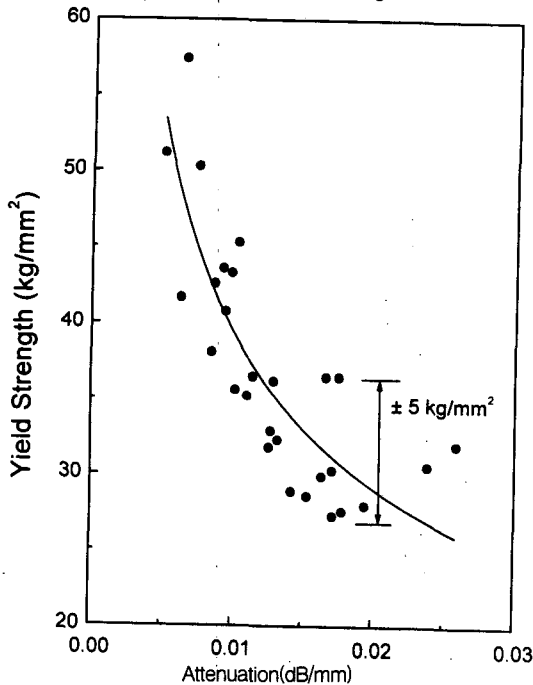
Fig. 11. 공진주파수와 감쇠측정의 예

측정결과에서는 grain size가 증가함에 따라 감쇠는 지수적으로 증가하고 있으며, 항복강도의 증가에 따라서는 반지수적으로 감소하고 있다. 또한 항복강도는 약 ±

5 kg/mm²의 오차내에서 평가될 수 있다.



(a) comparison of attenuation to grain size



(b) comparison of Yield strength to attenuation

Fig. 12. EMAT로 측정된 감쇠와 결정립크기의 비교

참고문헌

- 1) Nondestructive Testing Handbook, 2nd edition, Vol. 7, Sec. 10: American Society for Nondestructive Testing (1991)
- 2) R. B. Thompson, Proceedings of 1977 IEEE Ultrasonic Symposium, N.Y., 74 (1977)
- 3) R. G. Betjemann, H. V. Bohm, D. J. Meredith, and E. R. Dobbs, Phys. Lett. A25, 753 (1967)
- 4) M. R. Gaerttner, W. D. Wallace, and B. W. Maxfield, Phys. Rev. 184, 702 (1969)
- 5) H. L. Grubin, IEEE Trans. Sonics Ultrason. 16, 27 (1969)
- 6) E. R. Dobbs, J. Phys. Chem. Solids 31, 1657 (1970).
- 7) C. M. Fortunko, Proc. 1979 Ultrasonics Symposium, 253 (1979)
- 8) M. Mohr and P. Hoeller, IEEE Trans. su-23(5), 369 (1976)
- 9) R. B. Thompson, R. K. Elsley, W. E. Peterson, and C. F. Vasile, Proc. 1979 Ultrasonic Symposium 246 (1979)
- 10) K. Miyagawa, Y. Sasaki, N. Matsuda, and S. Sato, Proc. 9th WCNDT, 1 (1980)
- 11) L. R. Burns, G. A. Alers, and D. T. MacLauchlan, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation vol. 7B, 1677 (1988)
- 12) K. R. Whittington, M. A., Ph. D., D. Eng., F.I.E.E., Brit. J. NDT, May, 127 (1981)
- 13) R. B. Thompson, J. M. Smith, S. S. Lee, and G. C. Johnson, Metall. Trans. A 20A, Nov. 2431 (1989)
- 14) M. Hirao, H. Fukuoka, K. Fujisawa, and R. Murayama, Metall. Trans. A 20A, 2385 (1989)
- 15) J. C. Johnson and R. B. Thompson, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation vol. 12, 2121 (1993)
- 16) M. Hirao, H. Fukuoka, and Y. Murakami, Res. Nondestr. Eval. 4, 127 (1992)
- 17) K. Kawashima, J. Acoust. Soc. Am. 87(2), Feb., 681 (1990)
- 18) 안봉영, 이세경, 한국음향학회지 7(3), 10 (1988)
- 19) 안봉영, 김영환, 김영주, 응용물리 3(1), Feb., 67 (1990)
- 20) Bongyoung Ahn and Sekyung Lee, Proceedings of 9th Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industries, 391 (1986)
- 21) 이승석, 안봉영, 김영길, 정대혁, 이승주, KRIS-92-158-IR (1992)
- 22) Bongyoung Ahn, S. S. Lee, E. C. Hwang, Kyungyoung Jhang, S. K. Kim, and S. Y. Kim, Proc. 8th APCNDT, 623 (1995)

NDT '97 Tokyo를 다녀와서

장 경 영
한양대학교 기계공학부

지난 5월 15일부터 17일까지 3일간 일본 도쿄에서 열린 NDT '97 TOKYO에 참석하기로 한 것은 불과 행사 일주일 전이었다. 이렇듯 갑자기 일정을 잡은 것은 프로그램에 흥미 있는 논문 발표가 많아 직접 가보고는 싶은데 학교 사정상 학기 중인 관계로 강의의 진도 등 몇 가지 상황을 미리 조정해야 했기 때문이다. 아무튼 맘만 먹으면 당일치기로 급한 불일을 볼 수 있는 외국이 일본인데 하면서, proceeding을 읽는 것만으로는 발표 논문의 정확한 의도를 알 수 없다는 경험에 비추어 직접 들어보고자 하는 의지로 다소 무리한 일정이었으나 강행하였다.

우선 출발일을 14일로 택하여 동경행 첫 편인 오전 9시 Northwest편으로 동경 나리타공항에 닿았다. 오후에 동경 공업 대학을 방문하기로 되어 있었기 때문에 일찍 출발한 것이다. 동경 공업 대학 (Tokyo Institute of Technology)은 10년전 유학했던 곳이고 지금은 제자 한사람이 같은 전공 분야에 유학하고 있는 관계로 교류가 빈번한 터라 도쿄에 갈 일이 있을 때마다 항상 들리는 것이 상례로 되어 있었다. 이 대학은 도쿄 시내 메구로(目黒)와 요코하마의 두군데에 캠퍼스를 가지고 있는데, 요코하마 캠퍼스는 대학원과 각종 부설 연구소 중심으로 되어 있고 캠퍼스 자체가 나지막한 산 속에 있어 학교라기 보다는 소규모 연구 단지와 같은 분위기를 준다. NDT 관련 연구는 주로 요코하마 캠퍼스에서 다루고 있는데, 오랜만에 정보교류겸 자료수집차 이 곳 연구실을 방문하기로 했던 것이다.

여기서 동경 나들이에 익숙치 않은 독자들을 위하여 잠시 나리타공항에서 동경 시내로의 교통편에 대

해 소개한다. 많이 이용하는 교통편은 크게 세 가지로 구분된다. 1) 리무진 버스, 2) 일본 국철, 3) 스카이 라이너가 그것이다.



동경공업대학 요코하마 캠퍼스

리무진 버스는 TCAT(Tokyo city air terminal)와 YCAT (Yokohama city air terminal) 그리고 큰 역과 유명 호텔을 연결하며 공항 도착 로비에서 티켓을 구입해 바로 건물 밖의 승강장에서 승차하면 되므로 비교적 편리하다. 배차 간격도 10분정도로 길지 않아 오래 기다릴 필요가 없으며, TCAT의 지하는 시내를 통과하는 지하철 중착역으로 되어 있고 이동 보도로 연결되어 있어 무거운 짐이 있는 경우에 특히 편리하다. 그러나 공항에서 이용하는 모든 리무진 버스의 노선은 정체가 잦은 곳이라 급한 약속이 있는 경우에는 공항 리무진 버스 카운터에서 도착 예상 시간을 확인한 후에 이용하는 것이 좋다.

일본 국철과 스카이 라이너는 공항 건물의 지하에

있으며 국철은 동경 역까지 한시간 이내에 직행하며 동경 역에서 요코하마, 시부야, 우에노등으로 연결되고, 스카이 라이너는 우에노가 종착으로 시간은 역시 한시간 정도 걸린다. 그러나 30분에서 한시간 간격으로 출발하고 도착역에서 다른 행선지로 국철이나 지하철을 환승할 경우 대부분 거리가 멀고 계단이 많으므로 비교적 가벼운 짐을 소지하고 있을 때 편리하게 이용할 수 있다. 요금은 국철, 리무진 버스, 스카이 라이너의 순이다.

이번 동경 방문의 숙소는 제자가 예약해 준 일본 국제 교류 협회의 guest room으로 비좁기는 하지만 1일 3,500엔의 저렴한 가격으로 숙박할 수 있었다. 도쿄 안에서는 어느 호텔을 가더라도 비즈니스급에서는 비좁기는 매한가지이다. 그럼에도 불구하고 숙박비는 1박 1만 엔이 보통이다. 1박에 3만엔 정도 하는 특급 호텔이라면 좀 넓은는지 필자는 아직도 모른다. (가본 적이 없기 때문에...)

여기서 또 한가지 도쿄에서의 숙박 요금 체계에 대해 알아두자. 일본에서 자비로 숙박해 본적이 없는 사람이 가장 혼동하기 쉬운 것이 한 방에 여러 사람이 같이 투숙할 경우이다. 대부분의 호텔에서 제시하는 요금은 1인당 요금이다. 따라서 2인1실 1만 엔으로 제시된 호텔의 더블 룸에서 2인이 투숙한다면 지불해야 할 요금은 2만 엔이 된다. 더욱이 비즈니스급의 호텔에는 더블 룸이 별로 없다. 예약 없이 현지에서 저렴한 호텔을 구하려다 보면 경우에 따라서는 부부가 하룻밤을 생이별해야 하는 경우도 있다. 싱글 룸을 빌려서 둘이 들어가면 안될까 하는 피를 낼 수도 있으나 일본인의 체형으로 만들어진 침대인지 혼자서 자도 떨어질까 불안할 정도이다. 아무튼 교통과 숙박에 관한 한 세계 첨단의 물가임에 틀림없다.

이제 이야기를 비파괴검사학회로 돌리자.

이튿날, 행사장인 도쿄코쿠사이(東京國際)포럼으로 향했다. 도쿄 순환 전철인 야마노테센(山手線)의 유우라쿠초역(有樂町)역의 바로 옆이었다. 도쿄 지리에 꽤 익숙해져 있던 터라 기억에 없던 깔끔한 새 건물을 보는 순간 아 저기구나 하고 생각했다. 건물의 반쪽은 바닥에서 천정까지 탁 트인 공간으로 되어 있었으며 천정은 유선형의 배모양이었고 유리로 되어 있어 꽤나 멋을 부린 흔적이 역력하였다. 공조를

비롯한 창문 개폐 등 건물 관리가 인텔리전트화 되어 있는 듯이 보였다. 건물 대부분이 철재를 사용하였으며, 특히 유리로 싸인 공간 구조의 천정은 철골 용접 프레임으로 되어 있어서 그런 면에서 NDT 행사장으로 의미가 있었던 것 같다.

이 번 NDT '97 TOKYO에서는 일본 비파괴검사협회 춘계 대회와 비파괴검사 종합전이 같이 열렸다. 비파괴검사 종합전이 꽤 넓은 지하 홀을 가득 메우고 있었고 일본 비파괴검사협회 춘계 대회는 옆에 별도로 설치된 4개 세미나 실에서 진행되었다. 비파괴검사협회 춘계 대회만을 본다면 그리 큰 학회라 할 수 없었다. 하지만 비파괴검사 종합전은 규모면에서 꽤 놀랄 만하였고, 학회와 같이 열리는 것이 매우 효율적으로 느껴졌다.

그러면 먼저 학회의 인상에 대해 이야기하고 전시장 분위기에 대해 언급하기로 하자. 비파괴검사 방법으로서의 초음파, 방사선, 전자기, AE, 서모그래피 등 많은 물리 현상이 이용되고 있고, 최근에는 양전자 소멸이나 벌크하우징 잡음과 같은 새로운 방법도 이용되고 있어 관련 분야를 나열하자면 매우 광범위한 범위가 될 것이다. 따라서 발표되는 모든 내용이 흥미롭기는 하였지만 어차피 선택하여 들을 수밖에 없었으므로 통상 관심을 가지고 있던 초음파, AE, 레이저 응용 관련 테마를 선별하여 들었다. 총 발표 건수는 특별 강연 1개를 포함하여 20개 session에 73편에 이른다. 참고로 발표 제목을 뒤에 첨부한다.

발표 논문에서 관심을 끌었던 것은 표면파에 의한 재질의 손상 또는 변화의 정량적 평가에 관련된 논문이 많았던 것인데 여기에는 다시 전파에 대한 수치 해석과 회절 SH파, 크리이프파등 다양한 표면파의 응용이 제시되었다. 다음에 대표적인 세가지 내용만 소개한다.

첫째, 초음파의 전파에 대한 FEM수치 시뮬레이션은 선형 초점 PVDF 탐촉자의 초음파 전파 과정에 대한 것으로 운동 방정식과 경계 조건을 차분법을 이용하여 수치 해석한 것이다. 탐촉자와 시편 표면 간격을 자유자재로 변화시켜 가면서 시편 표면의 수직반사파에 대한 각종 표면파의 전파 시간차를 측정하여 누설 크리이프파, 표면 SV파 및 표면파 속도를 동시에 측정하도록 한 것인데, 이들 표면파의 속도

및 감쇄는 재료 표면 및 그 직하 조직의 형상과 특성에 의존하므로 후자가 전자에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션에 의해 해명할 수 있다면 각종 표면파 속도 및 감쇄에 대한 측정 결과를 이용하여 표면층의 재료 특성을 비파괴적으로 정확히 평가할 수 있을 것으로 생각되었다.

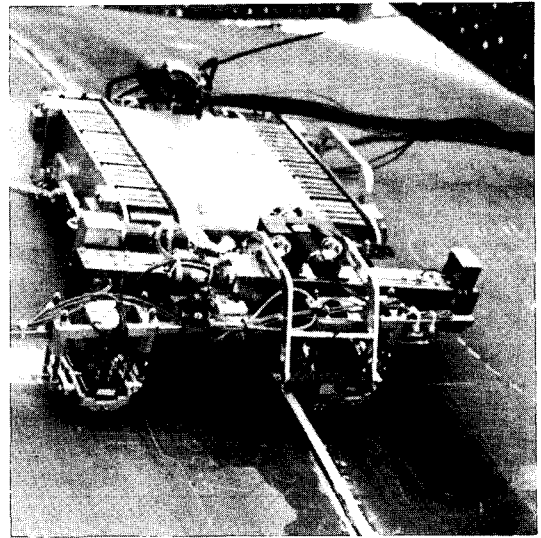
둘째, 회절 SH초음파는 종래의 종파 초음파 법이 종파의 재료 조직 변화에 대한 약한 감도와 투과법 사용에 의한 정보량의 희박화 때문에 신뢰높은 데이터를 얻기 곤란했던 점을 극복하기 위한 시도로 보여졌으며, 열처리나 쇼트피닝에 의한 표면경화강과 열처리 폴리염화비닐, 폴리플로플렌 등에 적용하여 탄성변형율과 변태생성물에 의해 발생하는 표면경화를 정량적으로 평가하였다고 보고하고 있다. 이 역시 바로 앞의 수치 시뮬레이션의 경우에서 밝힌 것처럼 표면파와 재료 직하 조직과의 상관성을 이용한 방법의 하나로 생각된다.

셋째, 크리프파는 또 다른 형태의 표면파로서 일반 표면파가 탐상면의 거칠기에 영향을 받고, 표면 SH파는 접촉 매질의 제약을 받는 반면 크리프파는 이들의 영향을 받지 않는 장점때문에 최근 많은 연구와 실험이 이루어지고 있다. 금번 학회에서는 이러한 표면파를 이용한 재료의 재질 변화에 대한 평가 방법론이 많은 주제로 등장하였던 것이 특징이면 특징이라 할 수 있다.

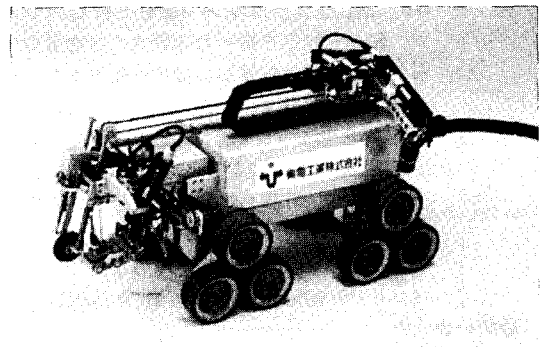
이외에도 초음파 현미경의 응용과 콘크리트 재료에 대한 비파괴평가법등이 눈길을 끌었지만 이들을 제외하고는 워낙 다양한 형태의 접근 방법이 발표되었기 때문에 그것을 단 몇 가지로 분류한다는 것은 필자의 능력으로는 매우 어려운 것으로 생각된다.

첫날 논문 발표 일정이 끝나고 전시회를 둘러보았는데, 우선 관련 업체가 대단히 많은 점에 놀랐다. 익히 들어왔던 업체도 있었지만 그렇지 않은 업체도 많이 있었다. 장비 전시 업체는 총 59개 업체로 UT관련 업체가 26사로 단연 많았고, RT관련이 13사, MT, PT, ET관련이 26사, AE, thermography, VT, laser, vision, 기타 주변기기등이 34사였다. (한 개 업체가 여러 개의 품목을 취급하는 경우도 있음) 그 중 (株) 帝通電子研究所라는 초음파 트랜스듀서 제작사와는

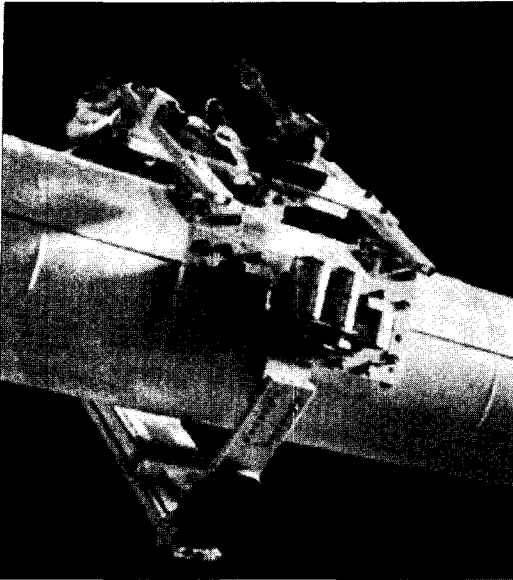
소형의 가변 앵글 프로브 제작에 대해 상담할 수 있어서 많은 도움이 되었다. 눈에 띄는 것중의 하나는 검사 로봇이었는데 사람이 직접 검사하기 곤란한 여러 조건에서의 검사를 자유자재로 신속하게 검사할 수 있기 때문에 향후 많은 수요가 있을 것으로 보였다. 평소 초음파 검사 로봇의 개발에 관심을 가지고 있던 터라 유심히 살펴보았는데 여러 가지 기술이 복합적으로 적용되어야 하기 때문에 분야간 interdisciplinary 한 협동 연구의 한 테마가 되리라 기대된다. 전시장에서 특기할 만한 것은 전시된 장비를 직접 조작해 보는 부스가 따로 배치되어 있었다는 점이다. 장비를 이해하고 기술적인 상담을 하기에 적절한 이벤트라고 생각되었다.



무케도식 자율주행 초음파탐상장치



강구조물 내부 두께 측정 시스템

배관 부식 검사용 γ 선 CT시스템

행사장 출구에는 등록시 배포한 앙케트를 수거하는 데스크가 마련되어 있었는데, 이를 제출하면 즉석에서 추첨하여 경품을 나누어주었다. 경품이 무엇이건 간에 대부분의 참가자들이 호기심에 참여하게 되었고 효과적인 수거 방법이라고 생각되었다. 앙케트는 대회 참가 소감과 진행에 대한 의견을 묻는 내용이었는데 주최측의 열의를 짐작할 수 있었다. 물론 지금까지 복권에서 500원을 넘어 당첨된 적이 없는 필자에게 별다른 행운이 주어질 리 없었다.

제한된 일정으로 대회장에는 하루하고 만나질 밖에 있을 수 없어던 점이 아쉬웠지만 매우 흥미롭고 유익한 기회였다.

Keynote Lecture : NDT Developments for the Nuclear Industry

Flaw Evaluation & Data Processing I

1. An Identification of Crack Depths from Eddy Current Signals
2. Signal Transformation of Eddy Current Signal Using FIR Filter
3. Analysis of Eddy-Current Signals by Wavelet Transform: Extraction and Evaluation of Flaw Signal Features in Composite Signals

Analysis & Simulation I

1. FEM Simulation of Ultrasonic Wave Propagation at Solid / Fluid Interface and in Anisotropic Solids
2. Ultrasonic Corner Reflection Model Using Ray Tracing Simulation

Analysis & Simulation II

1. Influence of Air Gap and Thickness of Specimen on Detectability in Yoke Method
2. Estimation of Magnetization State to Ferromagnetic Material in AC Magnetization
3. Two Dimensional Non-linear Electro-magnetic Field Simulation Technique for Alternative Current Magnetic Leakage Flux Testing
4. Eddy Current Distribution in Conductive Plate

Material Characterization I

1. Nondestructive Diagnosis of Thermal Degradation of Heated Rubber Using Diffracted SH Ultrasonic Waves

2. Nondestructive Determination of Hydrogen Content in Titanium by Diffracted SH Ultrasonic Waves
3. Evaluation of Thermal Embrittlement in Dual-Phase Stainless Steel through Electrical Resistivity Measurement
4. Evaluation for Thermal Embrittlement of Duplex Stainless Steel by Means of Sound Velocity Measurement in the Fine Region Using Phase Interference Method
5. Detection and Evaluation of Intergranular Attack Using Leaky Surface Acoustic Wave

Material Characterization II

1. Simulation of Thermal Embrittlement by Cahn-Hilliard Equation
2. The Effect of Voids on Ultrasonic Velocity Ratio
3. Change in Internal Friction during Ultrasonic Fatigue Deformation in Cast Inconel 718 Alloy
4. Behavior of AE during Ultrasonic Fatigue Test of Inconel
5. Detection of Fatigue Degradation in Tubes by Eddy Current Testing (Part 2)

Ultrasonic Measurement

1. Development of Remaining Ligament Measurement Equipment on Seamless Steel Pipes
2. Relation Between Crack Tip and Scattered Echo in TOFD Method of Ultrasonic Testing
3. Examination of Method Detecting Flaw by TOFD Technique
4. Ultrasonic Testing for Rail Using Chirp-Pulse Compression Processing
5. Development of Hardening Penetration Depth Visualization Technique Using Ultrasonic

Acoustic Microscopy

1. Theoretical Analysis of Resolution of Surface Acoustic Wave Imaging Method by SAM
2. Lens Properties for Measuring Wave Velocity Using Amplitude and Phase Acoustic Microscope
3. Surface Crack Monitoring on Round Bar Fatigue Test Specimen by Improved Scanning Acoustic Microscope
4. Measurement of Acoustic Properties for Wood by Acoustic Microscope

Concrete & Structure I

1. Nondestructive Evaluation of Defects Near Welded Parts of Steel Structure by Using Electromagnetic Testing Method
2. Application of Infrared Thermography Technique for Detection of Delamination in Steel-Concrete Composite Structures
3. Quantitative Evaluation of Filling of Resin for Refreshment of Bridge-Piers by Ultrasonic Mode Conversion Wave Method

Radiographic Testing I

1. Development of an New Computed Tomography
2. Development of High Speed Type High Energy X-ray CT/RT and Its Applications
3. Fundamental Study of the High Sensitivity Neutron Imaging System

Radiographic Testing II

1. Radioscopy Testing of Steel with Image Subtraction
2. Detectability of Discontinuities by RT for Heavy Wall Thickness 9% Nickel Steel Weldments
3. Evaluation for the Image Quality of Radiograph in Double Wall Exposure-Single Viewing Technique
4. The Investigation of Standardization of NDE for New Materials - Radioscopy -¹

Concrete & Structure II

1. Detection of Reinforcing Steel Bars in Concrete by Ultrasonic Reflective Method
2. Fundamental Study on Evaluation of RC Deck Slabs Deterioration by Ultrasonic Testing
3. AE Properties of Pressure Vessel Introduced Weld Defects during Proof Test

Flaw Evaluation & Data Processing II

1. Experimental Study of Propagating Characteristics for Creeping Wave
2. Experimental Study of Propagating Characteristics for Creeping Wave
(Surface Roughness, it's Sensitivity and Diffraction Phenomenon)
3. Integrity Evaluation of Half Buried Pipe Using Ultrasonic Testing Technique (Part 2)
4. Development of Detection Technique for Die Mark Using AE Technique

New Technology

1. Application of Accurate Non-contacting Shape Measurement without Influence of Aberration of Lenses for Cylindrical Object by Phase-Shifting Method Using Fourier Transform
2. Development of a Novel NDI System by Use of Magneto-optical Film
3. Study on Detection of the Electromagnetic Wave around the Defects by Micro Dipole Antenna
4. Study on Automatic Inspection System and Improvement of Detection Sensitivity of Defects by Induced Current Focusing Potential Drop Technique

Reliability on Examination

1. Human Reliability in Inspection
2. Reliability of the Ultrasonic Examination for Full-Scale Pressure Vessel
3. Report on the Evaluation of Inspection Results of the Wrought-to-Wrought Stainless Steel Pipes
4. Reliability of the Ultrasonic Testing of Dissimilar Weld Joints
5. Results of PISC III Study: On the Reliability for the Non-Destructive Inspection of the Heat Exchange Tubes in the Steam Generator

Sensor, Instrument & System I

1. Measurements of Crack Size in Welded Joint by Advanced AUT System
2. Evaluation System of Inclusion in Slab by High Frequency Ultrasonics Inspection
3. Development of an Ultrasonic Immersion Testing Method for the Detection of Nonmetallic Inclusions in Steel Products by Use of Double Line-focused Probe Array Technique
4. Residual Stress Measurement of Large Scale Welded Specimen by Surface SH Wave Velocity

Sensor, Instrument & System II

1. Multi-Channel Ultrasonic Flaw Detector Applying Digital Signal Processing
2. Experimental Research on Composite Probe for Angle Beam Testing
3. Ultrasonic Inspection System with Point Focusing Array Probe
4. Study on the Application of AUT on the Evaluation of Flaw Size in Welded Joint

Sensor, Instrument & System III

1. Automatic Inspection Unit and Method for Liquid Penetrant Testing
2. Non-Destructive Detection for Fine Iron Particles in Cu Wire by High Tc SQUID
3. Development of Magnetic Leakage Flux Testing System
4. Eddy Current Testing of Material Edges Using Uniform Eddy Current Probe

Stress-Strain Analysis I

1. Determination of Dynamic Stress Intensity Factors for Difference Aspects Plastics by Caustics Method
2. Photoelastic Analysis of Contact Pressure Distribution on the Surface of Back Shoulder in Supine Position
3. Stress Analysis an Contact Face of Flange Couplings by Freezing Photoelastic Method Based on The Finite Element Method

Stress-Strain Analysis II

1. Reflection Characteristics of a High Polymer Strip Plate with Fillet in Terms of Stress Waves Corrected for Velocity Dispersion
2. Measurement of Mechanical Properties of Plastic Film under Impact Load
3. Fatigue Properties of Safety Rupture Discs